электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК.681.78

Сенсорная система на основе когерентного рефлектометра для контроля утечек подводных трубопроводов с повышенной длиной и частотой опроса сенсора

***Жирнов А.А.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектроника и лазерная техника»

***Степанов К.В.**, студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Радиоэлектроника и лазерная техника»

***Нестеров Е.Т.**, ведущий инженер*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
НОЦ «Фотоника и ИК-техника»

Научный руководитель: Пнёв А.Б., к.т.н., доцент кафедры
«Радиоэлектроника и лазерная техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана
bauman@bmstu.ru

Одной из важнейших составляющих экономической стабильности Российской Федерации являются поставки углеводородов. Основным транспортом для их передачи служат трубопроводы. Их протяжённость может составлять от нескольких сотен метров, до нескольких тысяч километров. Располагаться они могут как на суше, так и проходить по дну моря.

В системах трубопроводного транспорта нефти и газа в нашей стране происходит более ста аварий в год с выходом продукта и в дальнейшем, по мнению экспертов, их число значительно возрастет. По информации, доступной «Greenpeace», от 10 до 20 миллионов тонн нефти и от 6 до 50 миллиардов кубических метров газа в России теряются ежегодно из-за утечек и загрязняют окружающую среду. Масштаб утечек составляет от 3% до 7% от общего количества добываемой нефти или газа [1].

В основном, аварии на трубопроводах происходят по причине износа труб (более 1/3 из них имеют возраст более 30 лет), из-за различного рода диверсий, из-за внутренней коррозии (внутрипромысловые трубопроводы) и из-за внешней коррозии (магистральные трубопроводы). На внутрипромысловых трубопроводах 42 % труб служат менее 5 лет из-за внутренней коррозии. При доведении количества утечек до уровня мирового стандарта можно сохранить, по расчётным данным, до 24 миллиардов кубометров газа [2].

Возникновение утечек также приводит к загрязнению окружающей среды углеводородами. Это очень плохо влияет на экологию территории, а устранение последствий таких аварий занимает много времени и требует больших денежных затрат.

Актуальность проблемы поиска утечек очевидна. Появление даже самой маленькой утечки может стать косвенно причиной другой, более серьезной аварии, например взрыва высвободившегося газа, а также разрыва трубопровода, что увеличивает затраты на ремонт. Отсюда следует, что экономически выгодно и необходимо обнаруживать утечки на ранней стадии их появления.

Системы контроля должны удовлетворять следующим требованиям: высокая чувствительность; точность определения места утечки; безопасность в эксплуатации; обеспечение контроля трубопроводов большой протяжённости; высокая степень надёжности, достоверности и автоматизации; отсутствие помех, оказывающих влияние на режим перекачки; экономичность; готовность к работе в любых климатических и погодных условиях.

Данные методы можно классифицировать на две больших группы: динамические, которые не требуют остановки работы трубопровода, и статические, для применения которых необходимо остановить перекачку продукта. При существующих методах динамического контроля существует возможность регистрации только значительных утечек (более 50 л/ч), неполадки меньших размеров регистрируют статическими методами.

На данный момент существует много способов обнаружения утечек в трубопроводах, различающихся по величинам детектируемых утечек, скорости сканирования и точности. Самыми известными являются следующие: метод отрицательных ударных волн; метод сравнения расходов; метод линейного баланса; радиоактивный метод; ультразвуковой метод (зондовый); акустический метод; метод акустической эмиссии; лазерный газоаналитический метод; визуальный метод; метод вихревых токов; магнитные методы контроля; комбинированный электромагнитный метод контроля и др. [3] Кратко опишем самые распространённые из них.

Метод понижения давления. Метод основан на понижении давлений в трубопроводе. ЭВМ через определённые промежутки времени записывает значения давления в точках измерения и сравнивает с записанными ранее. Если вычисленный градиент получается больше заранее установленного, то появляется сигнал тревоги. Метод хорошо подходит для непрерывного оперативного обнаружения значительных

утечек, но имеет низкую чувствительность к величине утечки и большую погрешность определения её положения.

Метод отрицательных ударных волн. Основан на регистрации волн понижения давления, возникающих в момент появления утечки и распространяющихся в обе стороны по трубопроводу со скоростью звука. В отличие от предыдущего метода может устанавливаться на трубопроводы любой структуры, но обладает теми же недостатками.

Метод сравнения расходов. Основан на постоянстве мгновенного расхода нефти в начале и конце участка трубопровода при отсутствии утечки и установившемся режиме перекачки. Также нечувствителен к мелким утечкам.

Ультразвуковой метод (зондовый). Основан на ультразвуковом эффекте, возникающем при истечении жидкости через сквозное отверстие в стенке трубопровода из-за локального процесса изменения давления и наступлением процесса кавитации.

Акустический метод. Основан на регистрации частот звукового спектра, возникающих при истечении транспортируемого продукта из трубопровода.

Последние два метода позволяют эффективно обнаруживать незначительные утечки. Но на данный момент для его реализации используются либо специальные зонды, перемещающиеся внутри трубы, что нежелательно при использовании протяжённых трубопроводов, либо микрофоны, обследование которыми производится вручную. Данные недостатки ухудшают автоматизацию процесса, увеличивают время контроля и снижают скорость обнаружения.

В работе [4] показано, что уровень звукового давления при утечке составляет около 140 дБ. Данная величина воздействия сравнима с эффектом от проезда тяжёлого грузового транспорта, а значит её можно зарегистрировать не только с помощью точечных, но и с помощью распределённых волоконнооптических датчиков.

В данной статье предлагается система, позволяющая осуществлять непрерывный контроль акустических сигналов вдоль всей протяжённости трубопровода в полностью автоматизированном режиме. Она основана на принципе когерентной рефлектометрии. Сущность этого метода заключается в том, что в измеряемый волоконно-оптический тракт вводится зондирующий оптический сигнал, который, распространяясь в волокне, частично затухает и частично рассеивается на неоднородностях. Часть излучения, рассеянного в пределах числовой апертуры волокна направляется волокном и возвращается обратно. Регистрируя и анализируя этот обратно рассеянный сигнал можно восстановить распределение потерь по длине волоконного тракта.

Рис. 1. Схема рассеяния импульса света на неоднородностях оптоволокна

Если длина когерентности лазера превышает ширину импульса света в волокне, то наблюдается эффект когерентного рассеяния света и суммируются амплитуды обратно рассеянных волн. При этом амплитуду такой суммарной волны можно представить как сумму векторов со случайной амплитудой и фазой. При когерентном рассеянии света суммарная амплитуда рассеянной волны изменяется вдоль волокна случайным образом, от своего максимального значения до нуля, из-за интерференции. Вследствие этого относительные флуктуации мощности рассеянного излучения составляют величину порядка 1, и регистрируемый фотоприемником сигнал (рефлектограмма) имеет значительные флуктуации. Если в определенном месте воздействовать на волокно, то интерференционная картина в этом месте изменяется, то есть, происходит фазовая модуляция рассеянных обратно волн и на соответствующем участке рефлектограммы наблюдается изменение сигнала [5].

Применение систем такого типа для регистрации утечек сейчас только начинает осваиваться, например, компания «Optasence» ставит одной из своих целей разработку DAS-датчика (distributed acoustic sensor – распределённый акустический сенсор) для обнаружения утечек [6].

Одной из задач, которую необходимо решить для повышения качества такой системы – согласование акустических диапазонов, излучаемых утечками и регистрируемых устройствами на основе когерентного рефлектометра. По имеющимся данным [7], основная эмиссия выходящего из трубопровода продукта и приходится на диапазон частот 10-40 кГц. В свою очередь максимальная частота получения измерений когерентным рефлектометром определяется длиной чувствительного участка по следующей формуле:

$$f_{scan} = \frac{c}{2 \cdot L_{\text{чувтв}} \cdot n} \qquad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, $L_{чувств}$ – длина чувствительного участка волокна, n – показатель преломления волокна. Для типичных значений $L_{чувств} = 50$ км, $n = 1{,}5$ получаем $f_{scan} = 2$ кГц. По теореме Котельникова, это позволит зарегистрировать сигнал с максимальной частотой $f_{Nq} = \frac{f_{scan}}{2} = 1$кГц. То есть требуется увеличение максимальной частоты, регистрируемой прибором. Как видно из формулы (1), этого можно достичь уменьшением длины чувствительного участка. Такой вариант в первом приближении очень нежелателен, так как трубопровод может иметь длину в несколько сотен километров, и обычно применяется схема с усилителями (рисунок 2), которая позволяет наоборот, увеличить длину сенсорного участка.

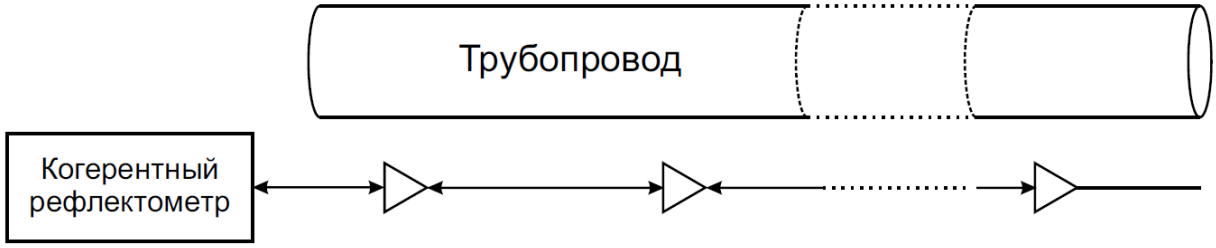

Рис. 2. Схема когерентного рефлектометра с усилителями

Чтобы совместить преимущества данных схем, была предложена их комбинация, выглядящая следующим образом:

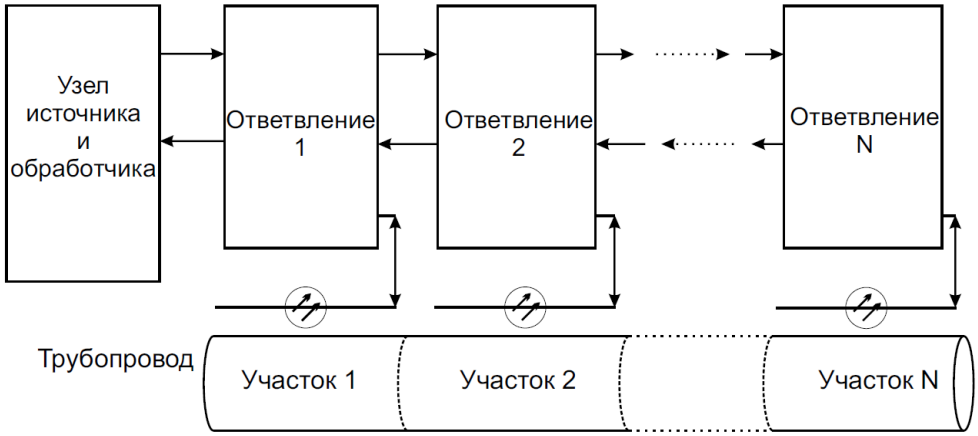

Рис. 3. Структурная схема спроектированного когерентного рефлектометра

В данной схеме импульс от узла источника распространяется поочерёдно до каждого узла ответвления, в котором часть излучения направляется в сенсорный участок, а часть – усиливается и передаётся к следующему узлу ответвителя. Таким образом, достигается одновременное уменьшение длин чувствительных участков, что повышает максимальную регистрируемую частоту, и сохранение общей протяжённости сенсора за счёт усиления импульса в EDFA по ходу его прохождения по ответвителям.

Длину участка волокна между ответвителями рационально выбрать равной монтажной длине подводного кабеля, равной 5 км, так как она обеспечит одновременно и удобство сборки системы, и попадание в требуемый диапазон регистрируемых акустических частот:

$$f_{Nq} = f_{scan}/2 = \frac{3 \cdot 10^8 м/с}{2 \cdot 5000 м \cdot 1{,}5 \cdot 2} = 10 кГц$$

Недостатком системы с большим количеством ответвлений и, как следствие, усилителей, является вносимое ими спонтанное излучение, которое уменьшает отношение сигнал/шум. Проведём расчёт SNR системы в зависимости о количества ответвителей, чтобы определить максимальное количество сенсорных каскадов, которое можно использовать в данной схеме. Он будет состоять из двух этапов:

1. Опеделение $SNR_{ед}$ одного сенсорного каскада системы.
2. Определение ухудшения сигнал/шум из-за фонового излучения N каскадов эрбиевых усилителей.

Рассмотрим данные этапы.

Произведём расчёт $SNR_{ед}$ одного каскада системы без усилителей, построенного по следующей схеме (рисунок 4):

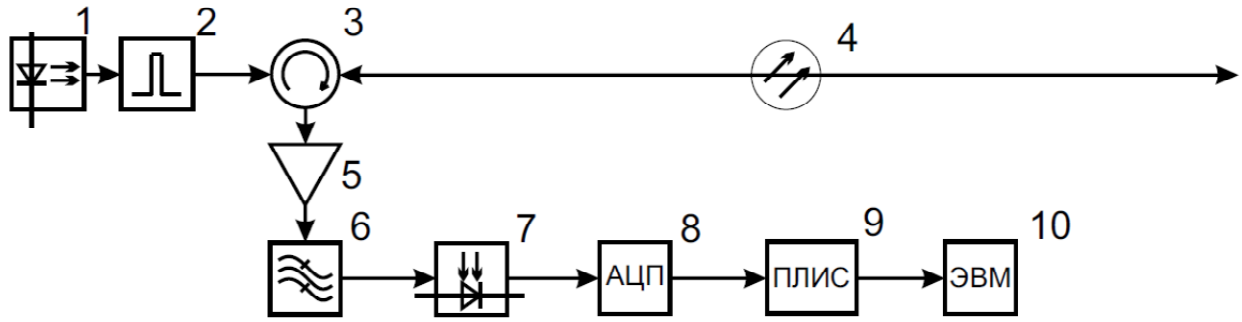

Рис. 4. Схема идеализированной системы

Примем максимальную допустимую мощность импульса, вводимую в волокно, равной 200 мВт. Как показано в [8], данная величина позволит не учитывать нелинейные эффекты, из которых пороговым будет являться фазовая самомодуляция. Распишем потери в линии при распространении импульса:

1. Потери на элементах (циркулятор и т.д.)

$$\eta = -4 \text{ дБ}.$$

2. Потери на затухание в волокне

$$К_{осл} = 2 \cdot \alpha \cdot L = 2 \cdot 0{,}17 \frac{дБ}{км} \cdot 5 \text{ км} = -1{,}7 \text{ дБ}.$$

3. Потери на релеевское рассеяние, которое в данном случае и будет формировать полезный сигнал, в зависимости от длины импульса $\tau = 200$ нс определяются следующим выражением [9]:

$$r = -80 + 10\log(\tau) = -80 + 10\log(200) = -57 \text{ дБ}.$$

4. Предусилитель 5 ставится для повышения мощности сигнала и даёт усиление $G = 100$ раз $= 20$ дБ.

Результирующая мощность, попадающая на приемник оптического излучения в данной схеме когерентного рефлектометра, составит:

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} + \eta + \text{К}_{\text{осл}} + r + G = 23 - 4 - 1.7 - 57 + 20 = -19{,}7 \text{ дБм}.$$

Далее необходимо определить, каков уровень шумов приёмника. В данной системе учитываем следующие шумовые компоненты:

1. Дисперсия теплового шума приёмника

$$\sigma_T{}^2 = \frac{4 \cdot k \cdot T \cdot \Delta f}{R} \qquad (2)$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$Дж/К – постоянная Больцмана, $T = 300$К - температура приёмника, $\Delta f = 5$ МГц - полоса частот приёмника, $R = 27$ кОм - сопротивление трансимпедансного усилителя.

2. Дисперсия дробового шума приёмника

$$\sigma_n{}^2 = 2 \cdot e \cdot \Delta f \cdot I(L) \qquad (3)$$

где $e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$Кл - заряд электрона, $I(L)$, А - величина тока, индуцируемого сигналом, приходящим от сенсора с расстояния L.

3. Дисперсия шума усилителя электрического сигнала

$$\sigma_{\text{А}}{}^2 = \text{А}\sqrt{\Delta f} \qquad (4)$$

где А $= 5$ пВт/$\sqrt{\text{Гц}}$ - удельная эквивалентная мощность шума

4. Дисперсия шума биения сигнала со спонтанным излучением в оптическом предусилителе

$$\sigma_{\text{с-сп}}{}^2 = S^2 \cdot G^2 \cdot 2 \cdot P_{sig} \cdot NF \cdot h \cdot \nu \cdot \Delta f \qquad (5)$$

где $S = 0{,}8$ - чувствительность приёмника, $G = 100$ - коэффициент усиления предусилителя, P_{sig}, Вт – мощность усиливаемого сигнала, $NF = 4$ - шум-фактор предусилителя, $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$Дж $\cdot$ с - постоянная Планка, $\nu = 193{,}4$ ТГц - частота излучения.

5. Шум биения спонтанного излучения со спонтанным в предусилителе

$$\sigma_{\text{сп}-\text{сп}} = (NF \cdot h \cdot \nu \cdot S \cdot G)^2 2 \cdot \Delta f(\Delta\nu - 0{,}5 \cdot \Delta f) \qquad (5)$$

$\Delta\nu = 12{,}5$ ГГц - ширина полосы оптического усилителя.

В результате получим выражение для определения параметра сигнал/шум идеализированной системы:

$$SNR_{\text{ед}} = \frac{\mathrm{P_{sig}}^2}{\sigma_T{}^2 + \sigma_n{}^2 + \sigma_{\text{А}}{}^2 + \sigma_{\text{с}-\text{сп}}{}^2 + \sigma_{\text{сп}-\text{сп}}{}^2} \approx 3000 \qquad (6)$$

Далее рассмотрим, как будет уменьшаться соотношение сигнал/шум системы при наличии усилителей в канале проведения импульсов. Все каскады с EDFA приведём к одному эквивалентному усилителю (рисунок 5), который вносит фоновый шум.

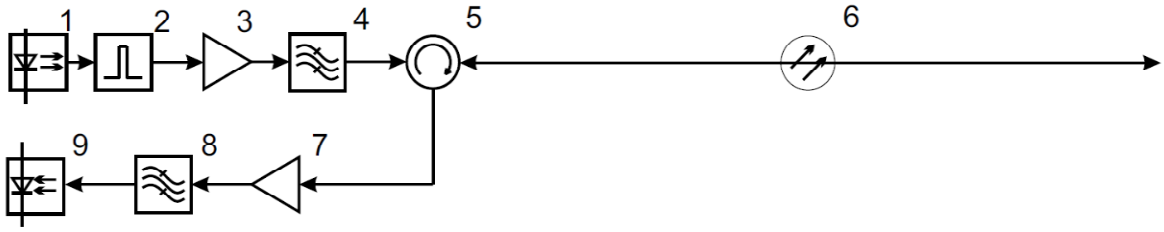

Рис. 5. Эквивалентная схема системы

Для схемы с такой структурой критичным могут оказаться шумы спонтанного излучения, вносимые эрбиевыми усилителями. Рассмотрим их влияние. Примем коэффициент усиления равным *G*, коэффициент деления разветвителей равным $К_{дел}$, затухание в волокне между усилителями на длине $L = 5$ км составит $K_{осл} = \alpha \cdot L = 0{,}17$ дБ/км·*5* км = *0,85* дБ = *1,216* раз.

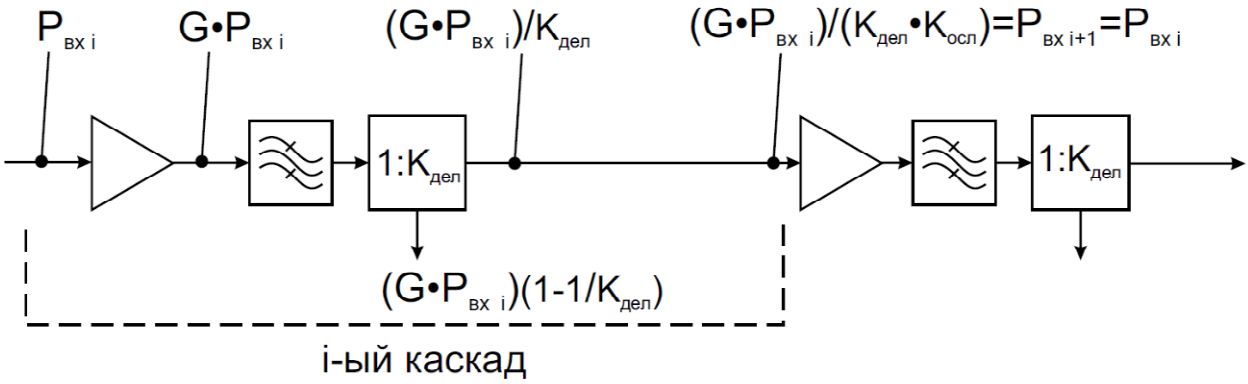

Рис. 6. Схема направленности интенсивности излучения в одном участке канала передачи импульса рефлектометра

Как видно из рисунка 6, для поддержания постоянного уровня сигнала параметр усиления EDFA должен составлять $G = K_{дел} \cdot K_{осл}$. Запишем выражение для преобразования интенсивности излучения в одном участке передачи импульса для схемы, изображённой на рисунке 6 с учётом наличия спонтанного излучения $\mathrm{P_{ASE}}$. На вход подаётся излучения мощности $\mathrm{P_{вх}}$, затухание в волокне $K_{осл}$.

Вход первого каскада

$$P_{вх\,1} = P_{вх}$$

Выход первого каскада

$$P_{вых\,1} = \frac{1}{K_{дел}} \cdot (G \cdot P_{вх} + P_{ASE})$$

Вход второго каскада

$$P_{вх\,2} = \frac{1}{K_{дел} \cdot K_{осл.}} \cdot (G \cdot P_{вх} + P_{ASE})$$

Выход второго каскада

$$P_{вых\,2} = \frac{1}{K_{дел}} \cdot \left(G \cdot \frac{1}{K_{дел} \cdot K_{осл.}} \cdot (G \cdot P_{вх} + P_{ASE}) \quad + P_{ASE} \right)$$

…

Выход N-го каскада

$$P_{вых\,N} = K_{осл} \left(\frac{G}{K_{дел} \cdot K_{осл}} \right)^N \cdot P_{вх} + \frac{P_{ASE}}{K_{дел}} \cdot \sum_{m=0}^{N-1} \left(\frac{G}{K_{дел} \cdot K_{осл}} \right)^m \quad (7)$$

На входе в бустер последнего участка N когерентного рефлектометра попадает мощность $P_{вых\,N} = K_{осл} \left(\frac{G}{K_{дел} \cdot K_{осл}} \right)^N \cdot P_{вх} + \frac{P_{ASE}}{K_{дел}} \cdot \sum_{m=0}^{N-1} \left(\frac{G}{K_{дел} \cdot K_{осл}} \right)^m$. Учитывая, что $\frac{G}{K_{дел} \cdot K_{осл}} = 1$, получим $P_{выхN} = K_{осл} \cdot (1)^{\mathrm{N}} \cdot \mathrm{P_{вх}} + \frac{P_{ASE}}{2} \cdot \sum_{\mathrm{m=0}}^{\mathrm{N-1}} (1)^{\mathrm{m}} = K_{осл} \cdot \mathrm{P_{вх}} + \frac{\mathrm{N}}{K_{дел}} \cdot P_{ASE}$.

Из полученного выражения видно, что мощность фонового шума будет увеличиваться с ростом числа каскадов и не зависит от мощности импульса, распространяющегося по каналу передачи. Вычислив $\mathrm{P_{ASE}} = (\mathrm{NF} \cdot \mathrm{G} - 1)\mathrm{h}\nu\Delta\nu = 1{,}915 \cdot 10^{-6}$ Вт и зная коэффициент усиления бустера $G = K_{дел} \cdot K_{осл} = 100 \cdot 1{,}2 = 120$ получим величину зашумлённости импульса в зависимости от числа каскадов:

$$\mathrm{P_{noise}} = \frac{\mathrm{N}}{K_{дел}} \cdot \mathrm{P_{ASE}} \cdot G = \frac{\mathrm{N}}{100} \cdot 1{,}915 \cdot 10^{-6} \cdot 120 = \mathrm{N} \cdot 2{,}3 \cdot 10^{-6}.$$

Согласно выражениям для дисперсий шумовых компонент (2) - (5), сильнее всего данные флуктуации импульса повлияют на величину сигнал-спонтанного излучения:

$$\sigma_{с-сп}{}^2 = S^2 \cdot G^2 \cdot 2 \cdot (P_{sig} + \mathrm{P'_{noise}}) \cdot NF \cdot h \cdot \nu \cdot \Delta f \quad (5)$$

где $\mathrm{P'_{noise}} = P_{\mathrm{noise}} + \eta + K_{осл} - 80 + 10\log\left(\frac{1}{f_{scan}}\right) + G = 10\log(N) - 47\ [дБ] =$

$= 1{,}8 \cdot 10^{-8} \cdot \mathrm{N}$ [Вт] – релеевское рассеяние от фонового излучения усилителей. Слагаемое $10\log(1/f_{scan})$ учитывает, что оно генерируется в течение всего времени сканирования сенсорного участка, а не только при прохождения импульса длительностью τ.

Так как уровень мощности полезного сигнала $P_{sig} \approx 10^{-5}$Вт, то видно, что даже при общей протяжённости системы 200 км, для чего потребуется N=40 каскадов, спонтанное излучение усилителей не окажется существенного влияния на соотношение сигнал/шум системы.

$$SNR = \frac{\mathrm{P_{sig}}^2}{{\sigma_T}^2 + {\sigma_n}^2 + {\sigma_A}^2 + (\sigma_{c-cn} \cdot (1 + 0{,}0018N))^2 + {\sigma_{cn-cn}}^2} \approx 2850$$

Более подробная схема окончательного технического решения, предлагаемого в данной статье, представлена на рисунке 7. Принцип действия прибора заключается в следующем. Излучение от источника 1 приобретает импульсную модуляцию в АОМ 2, далее на оптических усилителях 3 усиливается до уровня, необходимого для ввода в волокно и передачи до следующего участка. Оптический фильтр 4 убирает лишнее спонтанное излучение. Далее излучение попадает на оптический разветвитель 5, из которого часть импульса передаётся к последующим измерительным каналам, а часть – идёт в текущий сенсор. Сначала малая часть излучения отводится ответвителем 6 на вспомогательный приёмник 7.1 для получения импульса синхронизации рефлектограммы. Потом основная часть мощность через циркулятор 8 попадает в собственно сенсор 9, далее рассеянное назад излучение циркулятором направляется на предусилитель 10 с оптическим фильтром для повышения уровня энергии полезного сигнала и регистрируется приёмником 7.2. Далее АЦП 11, управляемое с ПЛИС 12 переводит сигнал в цифровой вид, после чего он отправляется через устройства коммутации 13 на узел обработчика, расположенный на береговой станции.

Рассмотрим некоторые особенности данной схемы. Устройства 3, 4, 5, 6, 7.1, 7.2, 8, 9, 11, 12, 13 размещаются в малогабаритных водонепроницаемых муфтах, к которым подводится электропитание, расположенных на морском кабеле, лежащем вдоль подводного трубопровода. Муфты разбиты на пары с общим усилителем для уменьшения их влияния на форму импульса.

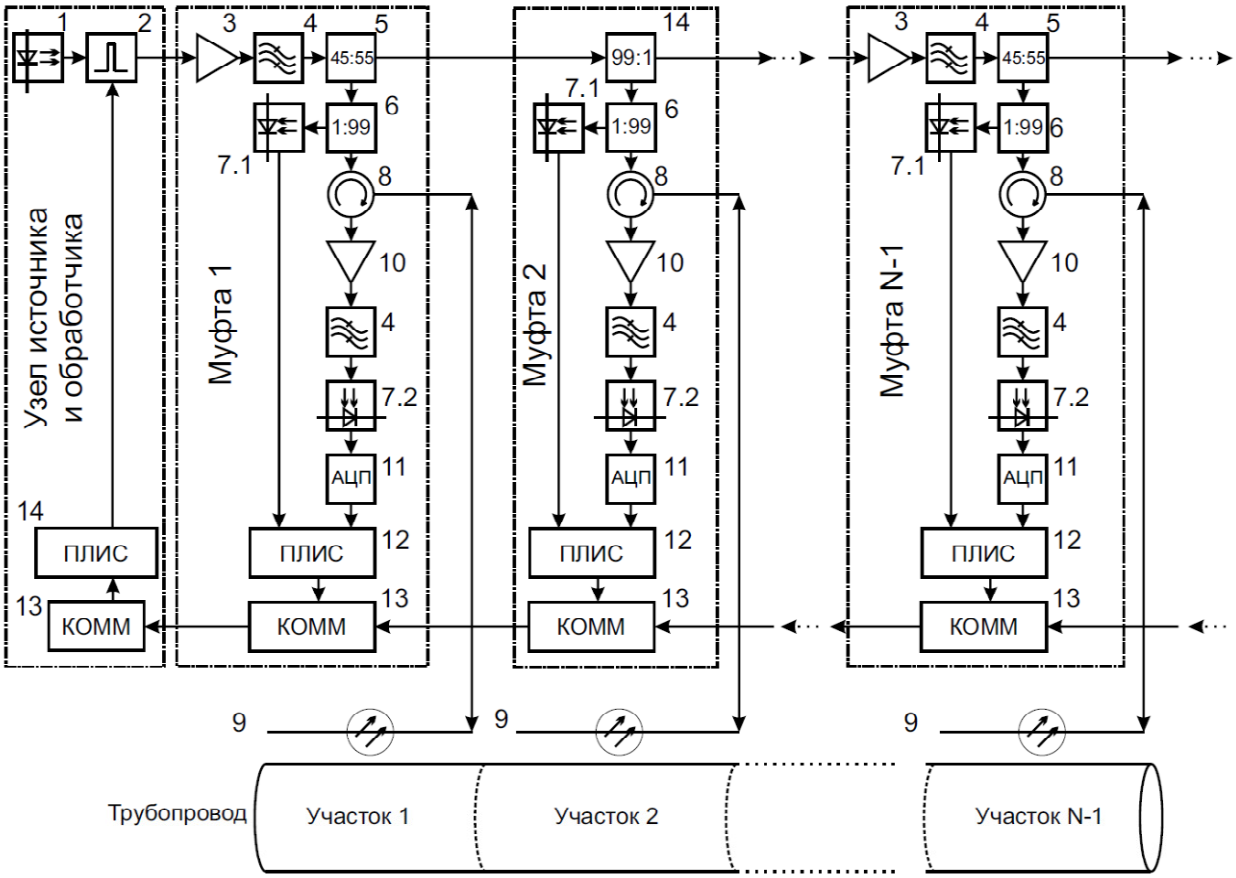

Рис. 7. Схема направленности интенсивности излучения в одном участке:

1 - полупроводниковый лазер с большой длиной когерентности, 2 – акустооптический модулятор, 3 – оптический усилитель (бустер), 4 – оптический фильтр, 5, 6 – оптические разветвители, 7.1, 7.2 – приёмники излучения, 8 – оптический циркулятор, 9 – сенсорное волокно, 10 – оптический предусилитель, 11 – аналогово-цифровой преобразователь, 12, 14 – программируемые логические интегральные схемы, 13 – устройства передачи информации

Заключение

Разработана система на основе когерентного рефлектометра с распределённым волоконно-оптическим датчиком, позволяющим регистрировать сигналы акустической эмиссии от утечек в трубопроводах.

Диапазон регистрируемых звуковых частот увеличен до 10 кГц за счёт уменьшения длины отдельных сенсорных участков.

Показано, что спонтанные шумы каскада усилителей не оказывают существенного влияния на соотношение сигнал/шум системы при длинах контролируемого объекта до нескольких сотен километров.

Список литературы

1. Блоков И.П. Краткий обзор о порывах нефтепроводов и объемах разливов нефти в России Режим доступа (Доклад Гринпис Россия). Режим доступа: http://www.greenpeace.org/russia/Global/russia/report/Arctic-oil/Oil_spills.pdf (дата обращения 28.03.2014).
2. Самусева Е.А. Разработка методических подходов к анализу риска аварий на морских трубопроводах: дис. … канд. техн. наук. М., 2011. 112 с.
3. Гольянов А.А. Обнаружение утечек в магистральных нефтепродуктопроводах с помощью сканирующих импульсов давления: дис. … канд. техн. наук. Уфа, 2004. 199 с.
4. Разработка и применение акустико-эмиссионных течеискателей. Режим доступа: http://impuls-ndt.ru/article_info.php?articles_id=87 (дата обращения 28.03.2014)
5. Мамедов А.М. оглы. Интерференционные эффекты при рэлеевском рассеянии света в одномодовых оптических волокнах: дис. … канд. физ.-мат. наук. Фрязино, 2007. 135 с.
6. Minto Ch., World's First Marinised Distributed Acoustic Sensing System from OptaSense. Режим доступа: http://www.optasense.com/2013/12/worlds-first-marinised-distributed-acoustic-sensing-system-from-optasense/ (дата обращения 28.03.2014).
7. Овчинников А.Л. Особенности распространения сигналов акустической эмиссии утечек в трубопроводах с жидкостью и аппаратура контроля герметичности: дис. … канд. техн. наук. Томск, 2006. 171 с.
8. Hisashi Izumita. Highly developed coherent detection OTDR technology and its applications to optical fiber networks monitoring. Ph. D., Japan, 2008. 225 p.
9. Листвин А.В., Листвин В.Н., Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРарт, 2005. 208 с.